

## تعیین پارامترهای جریان یابی در پیشران‌های دوپایه و دوپایه بهبود یافته به کمک رئومتر جریان اسکویژ

حسین مهدوی<sup>۱</sup>، علی اکبر طرلانی<sup>۲</sup>، مهدی گل ریز<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، ۲- دانشیار پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی، ۳- استادیار پژوهشگاه فضایی ایران  
(تاریخ وصول: ۰۹۷/۱۱/۲۷، تاریخ پذیرش: ۰۹۸/۲/۳)

### چکیده

در این کار پارامترهای رئولوژیکی نظیر تنش تسلیم، ضریب گرانروی و توان پاورلا برای دسته‌ای از فرمولاسیون‌های پیشران‌های دوپایه و دوپایه بهبود یافته با استفاده از روش رئومتري جریان اسکویژ به دست آمد. آزمون Squeeze Flow به منظور بررسی رفتار رئولوژیکی فارغ از اثرات لغزش در دیواره و تعیین نوع سیالیت در دماهای مختلف در پیشران‌های دوپایه و دوپایه بهبود یافته استفاده شد. نتایج نشان داد که در پیشران‌های دوپایه و دوپایه بهبود یافته رفتار الاستیک اولیه از نظر پدیده شناسی یکسان ولی از نقطه نظر مقدار متفاوت است، همچنین در منحنی جریان، تقعر و شیب نمودارها حاکی از تفاوت ساختاری و رفتار متفاوت رئولوژیکی میان پیشران‌های دوپایه و دوپایه بهبود یافته است. با افزایش ترکیب درصد مواد پراثرشی نیتراآمین (RDX) در پیشران‌های دوپایه بهبود یافته، نیروی متوسط جریان اسکویژ به سمت مقادیر بالاتر انتقال می‌یابند. با کاهش درصد نیترو گلیسرین نیز، رفتاری مشابه مشاهده می‌گردد. نتایج نشان داد مدل برازش منحنی شروود برای منحنی‌های جریان حاصل از پیشران‌های دوپایه بهتر از منحنی‌های جریان پیشران‌های دوپایه بهبود یافته عمل می‌کند که نشان دهنده انحراف رفتار رئولوژیکی پیشران‌های دوپایه بهبود یافته از سیالات هرشل - بالکی است.

**واژه‌های کلیدی:** پیشران‌های دوپایه بهبود یافته، آزمایش جریان اسکویژ، رئولوژی سیالات هرشل - بالکی، مدل شروود.

## Determination of Flow Parameters in Double-Base and Modified Double-Base Propellants Using Squeeze Flow Rheometry

H. Mahdavi, A. A. Tarlani, M. Golriz\*

Iranian Space Research Center  
(Received: 2/16/2019, Accepted: 4/23/2019)

### Abstract

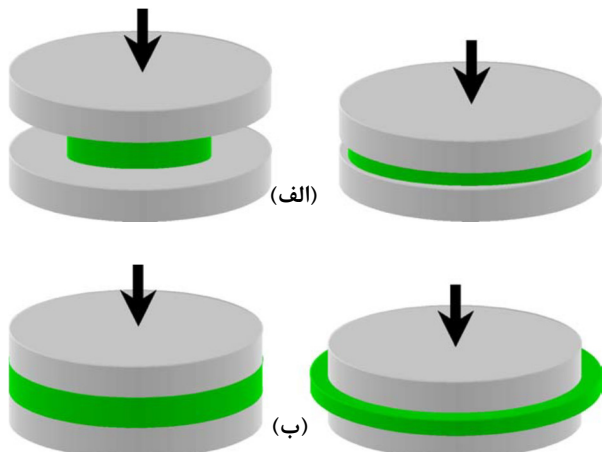
In this study, the rheological parameters such as yield stress, viscosity coefficient, and power law index were obtained for double-base propellants and modified double-base propellants formulations using the Squeeze flow rheometric method. Squeeze flow test was used to investigate the rheological behavior without wall slip condition, and to determine the temperature dependency of fluidity in double-base propellants and modified double-base propellants formulations. The results showed that for double-base propellants and modified double-base propellants formulations, the initial elastic behavior is identical in terms of phenomenology, however, differs in term of the value. There are distinct structural differences and different rheological properties between double-base propellants and modified double-base propellants formulations. By increasing the percentage of energetics nitramines (RDX) in modified double-base, the average squeeze flow force moves to higher values. A similar behavior is observed by decreasing the percentage of nitroglycerin. The results show that the Sherwood's model for the flow of double-base propellants is better than the curves of modified double-base propellants, which reflects the deviation of the rheological behavior of modified double-base propellants from Herschel-Bulkley fluids.

**Keywords:** Modified Double-Base Propellant, Squeeze Flow Test, Rheology, Herschel-Bulkley Fluids, Sherwood Model.

## ۱- مقدمه

نرم. به علاوه امکان انجام این آزمون در دستگاه‌های آزمایش کشش و فشار یونیورسال، آن را به روش جایگزین محبوبي برای تحلیل مواد با سطوح مدول مختلف بدل کرده است. در کنار تمامی این موارد، خصوصیات هندسی و جریانی که در این روش به طور پویا بر ماده حاکم است، یک ویژگی کلیدی در انتخاب و به کارگیری آن است، زیرا برخی از شرایط موجود در کاربردهای عملی (اکستروژن، قالب سازی فشاری و تزریقی<sup>۱</sup>، ریخته‌گری نواری<sup>۲</sup>، پمپ نمودن و غیره) را برای گستره وسیعی از مواد می‌توان شبیه‌سازی نمود [۵].

جریان‌های اسکویژ به جریان‌هایی گفته می‌شود که در آن‌ها، مانند شکل (۱)، ماده بین دو صفحه موازی فشرده شده و در جهت شعاعی به سمت بیرون صفحات رانده می‌شود [۸]. عموماً جریان اسکویژ ترکیبی از جریان‌های برشی و کششی تحت شرایط ناپایا است. بسته به شرایط مرزی، شکل هندسی (یعنی، نسبت فاصله بین صفحات به شعاع) و موقعیت درون میدان جریان، حالت برشی یا کششی می‌تواند به پدیده غالب جریانی در سامانه بدل شود [۲].



شکل ۱- جریان اسکویژ متقارن محوری با (الف) جرم ثابت از ماده بین صفحات، و (ب) ثابت بودن سطح تماس بین ماده و صفحات [۸].

تئوری جریان اسکویژ برای سیالات دارای تنش تسلیم در ابتدا توسط اسکات [۹] با شرط مرزی عدم لغزش روی دیواره بررسی شد. با این حال او نتوانست فرم بسته‌ای از حل مسئله را ارائه دهد. اما پیک [۱۰]، به دلیل پیش‌بینی یک ناحیه غیر برشی در نزدیکی خط مرکزی توسط مدل اسکات با او مخالف بود، که به تناقضی سینماتیکی ختم می‌شد. این مسئله پس از آن توسط کووی و استانمور [۱۱] مورد بررسی قرار گرفت که در این کار بر اساس فرضیه روان‌کاری<sup>۳</sup> (به مفهوم غالب بودن سرعت، در جهت شعاعی و گرادیان سرعت، در جهت محوری) فرم‌های مشخصی برای نیروهای جریان اسکویژ در سیالات هرشل - بالکلی،

مواد پرنرژری شامل سوسپانسیون‌هایی ویسکوز یا ترکیباتی نیمه جامد، با رفتارهای رئولوژیکی پیچیده هستند بنابراین به منظور کنترل و ارتقای فرآیندهای تولید این دسته از مواد لازم است تا خواص رئولوژیکی آن‌ها مشخص شوند. از آنجا که این مواد دارای ترکیبات شیمیایی و شرایط تولید مختلفی هستند، مشخصه‌یابی رئولوژیکی آن‌ها به منظور تضمین کیفیت محصول نهایی و بهینه‌سازی فناوری‌های به کار رفته در تولید این مواد خاص، به موضوعی چالش برانگیز بدل شده است. اختلاط، اکستروژن، رول کردن و دیگر فرآیندهای مربوطه، در زمره فناوری‌های رایج مورد استفاده در تولید مواد پرنرژری محسوب می‌شوند، که تأثیرات غیر قابل انکاری بر خواص سوزش پیشرانه نهایی دارند. به عنوان مثال اختلاط خمیرهای پیشرانه روش پیچیده‌ای است که امکان ژلاتینه کردن آن‌ها و چسبندگی مورد انتظار اجزای در حال ادغام را فراهم می‌آورد. این عمل همچنین ترکیب درصد محصول نهایی، با یکنواختی مورد نیاز و مقادیر توصیه شده گرانیروی را برای فرآیندهای بعد مهیا می‌سازد [۱].

در به دست آوردن خواص رئولوژیکی سیالات ویسکوپلاستیک حاوی مقادیر بالای ذرات پرکننده (مانند پیشرانه‌ها)، هنگامی که از رئومترهای رایج استفاده شود، با مشکلات قابل توجهی همراه خواهد بود. در تجهیزاتی که عامل گشتاور مطرح است، همانند رئومترهای مخروط و صفحه یا صفحات موازی، معمولاً به دلیل لغزش یا شکست نمونه در مناطق لبه‌ها در نرخ برش‌های بالا امکان تعیین خواص رئولوژیکی مقدرور نیست. به علاوه به دلیل زمان آسایش بالا، تنش‌های باقی‌مانده همراه با بارگذاری نمونه می‌تواند به طرز مؤثری اندازه‌گیری‌های رئومترهای نوسانی را تحت تأثیر قرار دهد. اگرچه معمولاً رسیدن به نرخ برش‌های بالاتر به کمک رئومترهای مؤئینه مهیاست، ولی لغزش بین فصل مشترک فلز - پلیمر و شکست نمونه می‌تواند نتایج این آزمون را زیر سؤال ببرد. از این رو نیاز گسترده‌ای برای توسعه روشی در ارتباط با تعیین کمی یا حتی کیفی خواص رئولوژیکی سیالات بسیار ویسکوز دارای تنش تسلیم وجود دارد [۲].

آزمایش‌های جریان اسکویژ به طور گسترده در مشخصه‌یابی‌های رئولوژیکی مواد غذایی، سوسپانسیون‌های با غلظت بالا، پلیمرهای مذاب، خمیرهای سرامیکی، کامپوزیت‌ها، خمیرهای پیشرانه و چندین گروه دیگر از مواد به کار رفته است [۷-۳]. روش جریان اسکویژ، روش مفیدی است که در آن، برخی از مشکلاتی که ممکن است در روش‌های رئومتری چرخشی رخ دهند، دیده نمی‌شود، همچون لغزش در فصل مشترک که می‌تواند نتایج را نامعتبر سازد، ایجاد شکست و تخریب در مواد پلاستیکی، مشکلات بارگذاری در مواد بسیار ویسکوز یا جامدهای

1- Compression and Injection Molding  
2- Tape Casting  
3- Lubrication Assumption

دست یافتند. در این منحنی مشخص است که این رابطه قادر به پیش‌بینی شیب اولیه ظاهر شده در داده‌های تجربی نیست.

در این پژوهش هدف اندازه‌گیری پارامترهای رئولوژیکی نظیر تنش تسلیم، ضریب گرانروی و توان پاورلا برای دسته‌ای از فرمولاسیون‌های پیش‌رانه دوپایه و دوپایه بهبود یافته با استفاده از روش رئومتری جریان اسکوئیز است. این کار برای اولین بار روی پیش‌رانه‌های حاوی ترکیبات نیتروآمینی انجام شده است و تغییرات رفتار جریان فشاری در آن‌ها با پیش‌رانه‌های دوپایه فاقد ترکیبات نیتروآمینی در دماهای مختلف به‌ویژه نزدیک به دمای اکستروژن شکل‌دهی آن‌ها مقایسه می‌شود. درنهایت از برازش منحنی مدل شروود برای تعیین پارامترهای رئولوژیکی استفاده می‌شود و نتایج برای هر دو نوع از پیش‌رانه مقایسه و تحلیل می‌شود.

## ۲- بخش تجربی

### ۲-۱- مواد

در این تحقیق پیش‌رانه دوپایه و دوپایه بهبود یافته از اختلاط سه ماده پرانرژی نیتروسولولز، نیتروگلیسیرین و RDX تهیه شدند. نیتروسولولز مورد استفاده از نوع پنبه باروتی (CP2) با درصد نیتروژن ۱۲/۵ درصد بوده است. نیتروگلیسیرین مصرفی نیز دارای خلوص بالاتر از ۹۹/۵ درصد بوده است. برخی از مشخصات و خواص ترکیبات مورد استفاده در جدول‌های (۱ و ۲) آمده است.

جدول ۱- مشخصات نیتروسولولز مورد استفاده در تهیه نمونه‌های سوخت.

خواص	مقدار	محدوده
میزان نیتروژن	۱۲/۹۵	±۰/۰۲
گرانروی	۱۶۲	۱۵۰-۱۹۰
نرمی	۹۲	۹۰-۱۱۰
قلیابیت	۰/۰۲	حداکثر

جدول ۲- برخی از خواص نیترو گلیسیرین استفاده شده در تهیه خمیر.

خواص	مقدار	محدوده
خلوص	۹۹	±۰/۰۲
پایداری به روش آبل	۳۰	حداقل

### ۲-۲- روش تهیه نمونه‌ها

آمیزه‌های خمیر پیش‌رانه با استفاده از یک دستگاه کنت با همزن‌های Z شکل تهیه شدند. طراحی نمونه‌ها با آزمایش تاگوچی و به کمک نرم‌افزار Minitab برای سه متغیر مستقل، در سه سطح (طبق جدول ۳) انجام شد. در طراحی فرمولاسیون این نمونه‌ها متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده شامل نسبت نیتروسولولز به نیتروگلیسیرین (NC/NG)، نسبت نیتروسولولز به دی نیتروتولون (NC/DNT) و درصد ماده پرانرژی RDX بوده است. جهت تهیه نمونه‌ها ابتدا یک خمیر پایه شامل ۸۵ درصد نیترو گلیسیرین

پاور - لاو و بینگهام، و برای اعداد پلاستیسیته اصلاح شده (معادله ۱) بزرگ (معادله ۲) و کوچک ارائه داد.

$$S = \frac{R\dot{\eta}\eta_{HB}^{1/n}}{h^2\tau_0^{1/n}} \quad (1)$$

$$F = \frac{\pi\tau_0 R^3}{h} + \frac{2\pi\eta_{HB}(-\dot{h})^n}{h^{2n+1}(n+3)} \left(\frac{2n+1}{n}\right)^n R^{n+3} \quad (\text{for Large } S) \quad (2)$$

این رابطه برای سیالات هرشل - بالکی است و از قرار دادن  $\tau_0 = 0$  یا  $n = 0$  معادلات مورد نظر برای سیالات پاور - لاو و بینگهام نتیجه می‌شوند. با این حال برای محدوده‌های متوسط عدد بدون بعد پلاستیسیته نیاز به روش‌های حل عددی بود. آدامز و همکاران [۱۲]، راه حلی برای توزیع فشار در کل بازه‌های سرعت ارائه داد، که در محدوده‌های میانی نیز با خطای کوچکی، جریان اسکوئیز را پیش‌بینی می‌کرد.

مدل‌های با شرط مرزی لغزش کامل روی دیواره‌ها (جریان کشیدگی) نیز به خوبی توسعه داده شدند [۱۳]، که در مدل لغزش نسبی پیشنهاد شده توسط شروود و دوربان [۱۴] برای سیالات پاور - لاو و بینگهام نیز استفاده شد. شروود و دوربان پس از آن، در پژوهش دیگری مدلی برای جریان اسکوئیز سیالات هرشل بالکی با لغزش نسبی روی دیواره‌ها ارائه دادند [۱۵]. برای لغزش‌های اندک این رابطه به فرم معادله (۳) است.

$$F = \pi R^2 \left[ \sigma_c \left(\frac{-\dot{h}}{h}\right)^n + 3^{1/2}\tau_0 \right] \left(1 + \frac{2m R}{3^{3/2} h}\right) \quad (3)$$

که در آن،  $\sigma_c = 3^{(1+n)/2}\eta_{HB}$  و  $m$  ضریب اصطکاک ثابتی است که می‌تواند مقداری بین صفر و یک بپذیرد. برای سطوح کاملاً زبر برابر با یک است و در سطوح کاملاً صاف و صیقلی مقداری برابر صفر به خود می‌گیرد. در پژوهش‌های جریان اسکوئیز انجام شده بر روی خمیرها نشان داده شده که یک ناحیه دایره‌ای مرکزی بدون رخ دادن لغزش توسعه می‌یابد و با لایه‌های لغزنده احاطه شده است [۱۶]. این مشاهدات بعدها توسط محققان به توسعه مدل‌های جدید برای سیالات بینگهام منجر شد [۱۷].

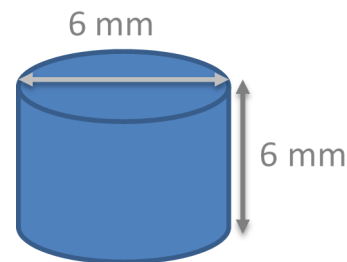
با مرور مقالات مختلف منتشر شده در باب رئومتری جریان اسکوئیز، مشخص می‌شود که یکی از مهم‌ترین مسائل در این زمینه، استخراج پارامترهای مدل‌های رئولوژیکی از نتایج آزمایش‌ها است. به‌عنوان مثال شروود [۱۸] به تعیین تنش برشی ظاهری و نرخ برش ظاهری در آزمایش‌های اسکوئیز و از آن طریق دستیابی به پارامترهای رئولوژیکی پرداخته است. در کنار آزمایش‌های جریان اسکوئیز با سرعت ثابت، آزمایش‌های نیرو ثابت نیز بررسی شده‌اند، که برای تعیین تنش تسلیم به کمک آزمایش جریان اسکوئیز توصیه شده است. در میان تحقیقات متعدد موجود در این زمینه، کووی و استانمور [۱۹] از طریق برازش منحنی با مدل تحلیلی به‌دست آمده برای سیال هرشل - بالکی سعی در تعیین پارامترهای مدل رئولوژیکی هرشل - بالکی داشتند. در این پژوهش از برازش منحنی به کمک مدل‌های تحلیلی جریان اسکوئیز، سعی در تعیین پارامترهای رئولوژیکی داشتند. شروود و دوربان در کنار ارائه این مدل برای آزمودن مدل خود و مقایسه با روش عددی آدامز [۲۰] با انتخاب ضرایب اصطکاک مختلف به منحنی شکل (۱۲)

انگلستان به کار رفته است. دستگاه متشکل از دو صفحه موازی به شکل دیسک‌هایی با قطر حدود ۳ سانتی‌متر است. صفحه پایینی دستگاه ثابت و صفحه بالایی آن متحرک است. لودسل مربوط به اندازه‌گیری نیرو نیز بر روی صفحه بالایی نصب شده، که بدین ترتیب امکان اندازه‌گیری نیروی لازم برای حرکت ثابت صفحه بالایی اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. در این تحقیق از آزمایش جریان اسکوییز با سرعت ثابت بهره برده شد. سرعت آزمون پس از انجام چند پیش‌آزمایش بر روی عدد  $10 \text{ mm/min}$  تنظیم شد. با توجه به ابعاد دستگاه آزمایش که دارای قطری در حدود ۳ سانتی‌متر بود، آزمایش اسکوییز در نوع حجم ثابت به وقوع می‌پیوست. همان‌طور که در قسمت‌های پیشین گفته شد نمونه‌ها پیش از شروع آزمایش به مدت ۲۴ ساعت در شرایط دمایی آزمون قرار گرفتند. پیش از قرار دادن نمونه‌ها بین دو صفحه دستگاه، گپ اولیه ۷ میلی‌متر، و نیرو برابر صفر تنظیم شد. سپس نمونه بین دو صفحه دستگاه قرار گرفته و آزمایش آغاز شد. برای تمامی نمونه‌ها سعی شد تا عمل فشردگی تا ارتفاع گپ برابر با حدود ۳ میلی‌متر ادامه یابد، اما از آنجا که لودسل همراه دستگاه قطعه حساسی بود، امکان ادامه دادن بیشتر فشردگی تا مهیا نبود. هر آزمایش بین ۳ تا ۵ بار تکرار شد، تا نتایج به‌دست آمده از اطمینان قابل قبول برخوردار شوند. هر آزمایش بین ۳ تا ۵ بار تکرار شد، تا نتایج به‌دست آمده از اطمینان قابل قبول برخوردار شوند.

### ۳- نتایج و بحث

در شکل (۳) دو منحنی از میان نتایج آزمایش‌های جریان اسکوییز، به منظور بررسی نتایج انتخاب شده‌اند. در قسمت (الف) نمودار نیروی فشاری بر حسب جابه‌جایی صفحه بالایی برای نمونه پیش‌رانه دوپایه در دمای ۴۰ درجه سلسیوس به تصویر کشیده شده است. در قسمت (ب) نیز نمودار نیروی فشاری بر حسب جابه‌جایی صفحه بالایی برای نمونه پیش‌رانه دوپایه بهبودیافته در دمای ۴۰ درجه سلسیوس آمده است.

و ۱۵ درصد نیتروسولوز تهیه شد. سپس با اضافه کردن سایر اجزاء به ترکیب خمیر پایه، نمونه‌های ۱ تا ۹ مطابق جدول (۳) تهیه شدند. نمونه‌ها سپس با استفاده از یک نورد به ورقه تبدیل شدند. همچنین ورقه‌های پیش‌رانه در یک دستگاه پرس با فشار ۸۰ بار به استوانه‌هایی با قطر ۶ میلی‌متر جهت استفاده در آزمون‌های اسکوییز تبدیل شدند. از آنجا که در اکثر مدل‌های تئوری یکی از فرض‌های اصلی ساده کننده، نسبت پایین ارتفاع به قطر نمونه است [۸-۱۶]، در این پژوهش میله‌ها با ارتفاع ۶ میلی‌متر (شکل ۲) بریده شد تا در طول آزمون جریان اسکوییز این نسبت برقرار باشد.



شکل ۲- ابعاد در نظر گرفته شده و شکل هندسی نمونه، برای آزمایش جریان اسکوییز.

برای آزمایش‌های جریان اسکوییز با توجه به اینکه شکل‌دهی این نوع از پیش‌رانه‌ها در دماهای بالاتر از محیط و نزدیک به ۸۰ درجه سلسیوس انجام می‌شود، به منظور بررسی روند تغییرات خواص با دما، سه دمای ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. برای حصول اطمینان از یکنواختی دما در سرتاسر ماده، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت پیش از هر آزمایش درون آن تنظیم شده در دمای آزمایش قرار داده شدند.

### ۳-۲- شرایط آزمایش جریان اسکوییز

در این پژوهش، به منظور انجام آزمایش‌های جریان اسکوییز، دستگاه آزمایش فشار و کشش Testometric ساخت شرکت ZwickRoell

جدول ۳- طراحی آزمایش و فرمولاسیون پیش‌رانه‌های دوپایه و دوپایه بهبود یافته تولیدی.

CMDB9	CMDB8	CMDB7	CMDB6	CMDB5	CMDB4	CMDB3	CMDB2	CMDB1	
۵۵/۰۷	۶۲/۱۸	۴۴/۳۴	۵۸/۴۲	۴۱	۴۹	۴۰/۳۴	۴۷/۴۲	۵۴/۲۸	نیتروسولوز
۴/۹	۷/۹	۶/۳	۵/۲	۵/۲	۶/۹	۳/۶	۶	۷/۸	دی نیترو تولوئن
۱۳	۰	۲۷	۰	۲۷	۱۳	۲۷	۱۳	۰	RDX
۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	سنترالیت II
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۹	۱	۱	وازلین
۲۳/۰۴	۲۵/۹۳	۱۸/۳۶	۳۳/۳۸	۲۲/۸	۲۷/۱	۲۵/۱۶	۲۹/۵۸	۳۳/۹۲	نیتروگلیریرین
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	کل
۲/۴	۲/۴	۲/۴	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۶	۱/۶	۱/۶	(NC/NG)
۱۱/۲	۷/۹	۷	۱۱/۲	۷/۹	۷	۱۱/۲	۷/۹	۷	(NC/DNT)
۴/۶۶	۳/۲۹	۲/۹۲	۶/۲۲	۴/۳۹	۳/۹	۷	۴/۹۴	۴/۳۸	(NG/DNT)
۲۷/۹۴	۳۳/۸۳	۲۴/۶۶	۳۴/۵۸	۲۸	۳۴	۲۸/۷۶	۳۵/۵۸	۴۱/۷۲	(NG+DNT)

همان طور که از شکل (۴) برمی آید، رفتار پیشرانه‌های مختلف در اثر تغییر دما متفاوت است. اما مسئله‌ای که بین این پیشرانه‌ها مشترک است، این است که در تمامی موارد رفتار پیشرانه با افزایش ۴۰ درجه‌ای دما از ۴۰°C به ۸۰°C کاملاً تغییر می‌کند. اما افزایش ۲۰ درجه‌ای دما تأثیر همسانی بر روی تمامی پیشرانه‌ها نداشته و در برخی موارد این اثر بسیار محدود بوده است (مانند نمونه CMDDB3 در شکل ۴). به‌علاوه اشتراک دیگری که بین منحنی‌های نیرو بر حسب ارتفاع لحظه‌ای نمونه مشهود است، کم‌رنگ‌تر شدن نسبی پاسخ الاستیک اولیه با افزایش دما است. این بدین معنا است که رفتار ماده در دماهای بالاتر به سیالات ویسکوپلاستیک نزدیک می‌شود.

برای تحلیل بهتر اثر دما بر رفتار رئولوژیکی پیشرانه‌های دوپایه تحت آزمون جریان اسکویژ می‌توان آنالیزی همانند کارالی و پپر [۲۱] طراحی کرد. اگر نمودار فشار متوسط وارده بر نمونه‌ها (معادله ۴) را در یک بازه کاهش ارتفاع مشخص از نمونه‌ها بر حسب دما ترسیم کنید، به نمودارهایی مشابه آنچه در شکل (۵) آمده می‌رسید.

$$F_{av} = \frac{1}{H} \int_0^H F(h) dh = \frac{1}{H} \sum_{i=1}^N \left( \frac{F_i + F_{i+1}}{2} \right) \times (\Delta h)_i \quad (4)$$

همان طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود تابع نیرو بر حسب دما تشکیل منحنی غیر خطی می‌دهد. حال اگر مانند آنچه در شکل (۶) آمده، نمودار لگاریتم طبیعی نیروی متوسط را بر حسب معکوس دمای مطلق ترسیم کنید، به رابطه‌ای خطی دست خواهید یافت. از معادله نمایی حاصل می‌توان به منظور درون‌یابی و برون‌یابی نتایج برای دیگر دماها بهره برد.

### ۳-۲- مقایسه نمونه‌های مختلف و اثر ترکیب درصد اجزاء

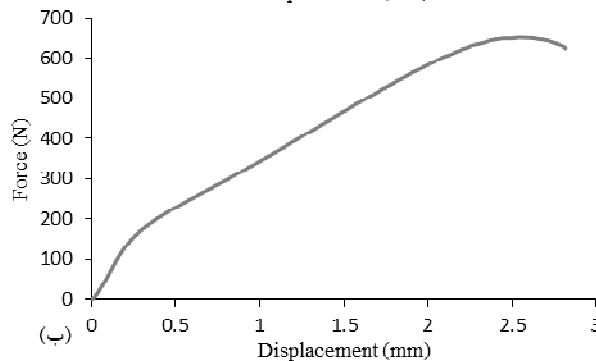
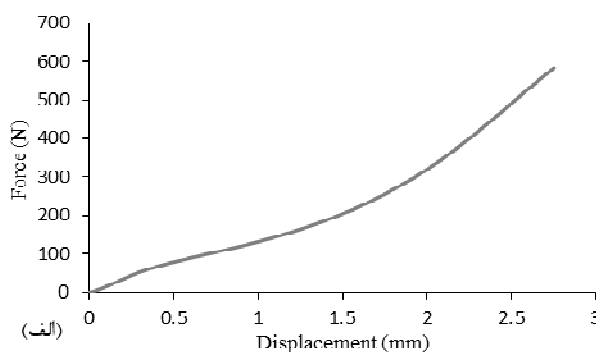
در شکل (۷) منحنی‌های نیرو بر حسب فاصله بین دو صفحه، به‌دست آمده از آزمایش‌های جریان اسکویژ در دمای ۸۰ درجه سلسیوس برای نمونه‌های ۱ تا ۹ به تصویر کشیده شده است. دو نمونه پیشرانه دوپایه (نمونه‌های ۱ و ۶) در شکل (۷) مشخص است که رفتاری کاملاً متفاوت با دیگر نمونه‌ها و مشابه با یکدیگر دارند. در مقایسه با دیگر نمونه‌ها، پاسخ الاستیک در این دو نمونه پیشرانه بسیار کوچک‌تر است. همچنین در منحنی نیرو - ارتفاع برای این دو پیشرانه افت نیرو با کاهش ارتفاع ماده مشاهده نمی‌شود و رفتار آن‌ها کاملاً موافق با تئوری‌های موجود برای سیالات ویسکوپلاستیک است.

پارامتر مساحت زیر نمودارهای نیرو - ارتفاع گپ برای مقایسه نمودارها برگزیده شد. مساحت‌ها برای محدوده بین ارتفاع اولیه ۶ میلی‌متری تا ارتفاع ۴ میلی‌متری (که تمامی منحنی‌ها در آن بازه تعریف شده‌اند)، محاسبه شد. اعداد حاصل از محاسبات مربوط به مساحت زیر نمودارها در نمودار میله‌ای شکل (۸) آمده است.

مساحت زیر نمودار نیرو - جابه‌جایی ارتفاع نمونه، دارای ابعاد نیرو در فاصله یا واحد N.m یا J است. در مقالات ارائه شده در باب آزمایش‌های فشردده‌سازی مانند پژوهش لویکی [۲۲]، این تعیین مساحت زیر نمودار کاری رایج بوده و از پارامتر به‌دست آمده با عنوان کار حاصل از عمل فشردده‌سازی یاد می‌شود که مفهومی برای روشن شدن میزان سختی یا نرمی نمونه به شمار می‌رود.

نمودار قسمت (الف) در شکل (۳) فرمی به مانند اکثر نمودارهای گزارش شده در منابع دارد. تا محدوده جابه‌جایی حدود ۰/۵ mm شاهد پاسخی الاستیک از نمونه هستید که شروع و دوربان [۱۵] نیز در نتایج خود به این رفتار اشاره داشته‌اند.

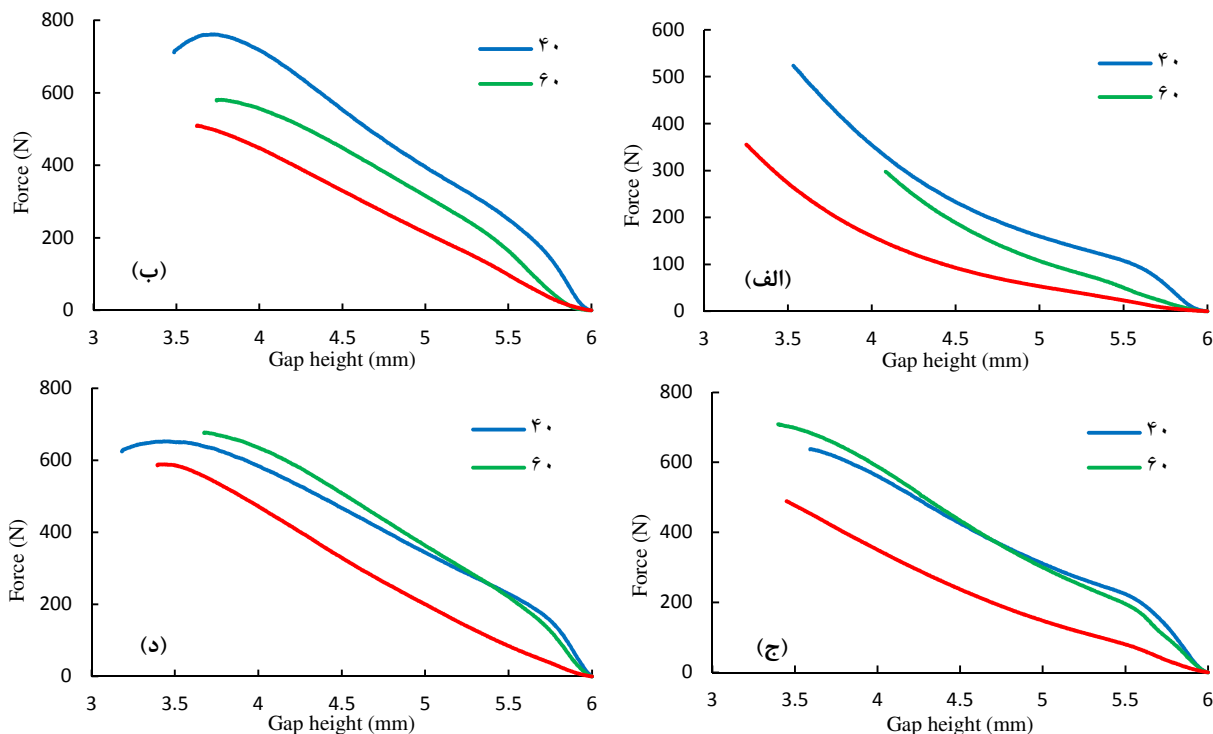
در قسمت (ب) نیز منحنی دارای پاسخ الاستیک اولیه بوده که این بار این رفتار الاستیک شدت بیشتری دارد. همچنین در طول روند انجام آزمایش و پیشروی صفحه بالایی عاملی در جهت کاهش نیرو عمل می‌کند. طی مشاهدات حین انجام آزمایش‌ها نمونه‌های پیشرانه دوپایه بهبود یافته دارای تردی و شکنندگی خیلی بیشتری نسبت به نمونه‌های دوپایه معمولی بودند که می‌تواند علت این روند باشد. در جابه‌جایی حدود ۲/۵ mm صفحه متحرک روند افزایش نیرو متوقف شده و پس از آن نیرو کاهش می‌یابد. تفاوت در تقعر منحنی‌ها نیز از تفاوت در رفتار جریان فشاری این دو نوع پیشرانه حکایت دارد [۷].



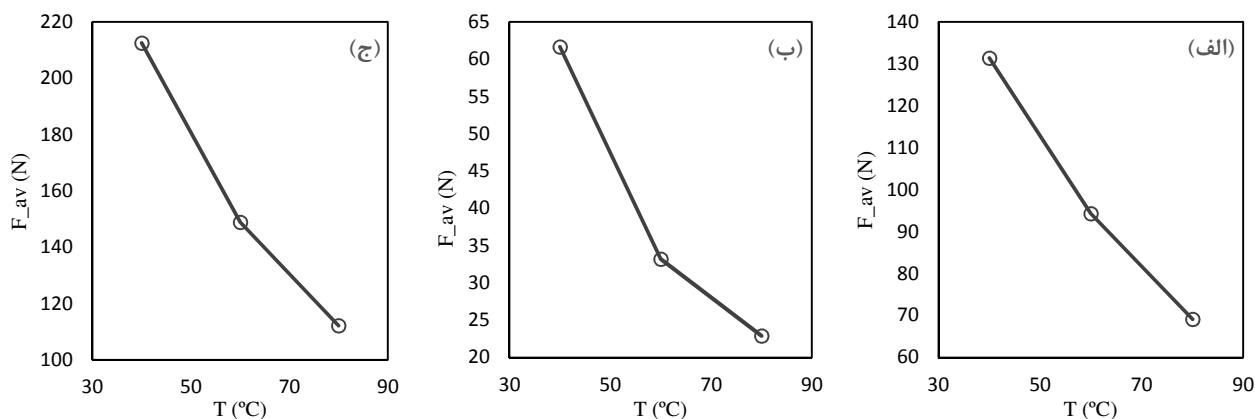
شکل ۳- نتایج آزمایش جریان اسکویژ در دمای ۴۰°C؛ (الف) پیشرانه دوپایه CMDDB3؛ (ب) پیشرانه دوپایه بهبود یافته CMDDB5.

### ۳-۱- بررسی اثر دما بر نتایج آزمایش جریان اسکویژ

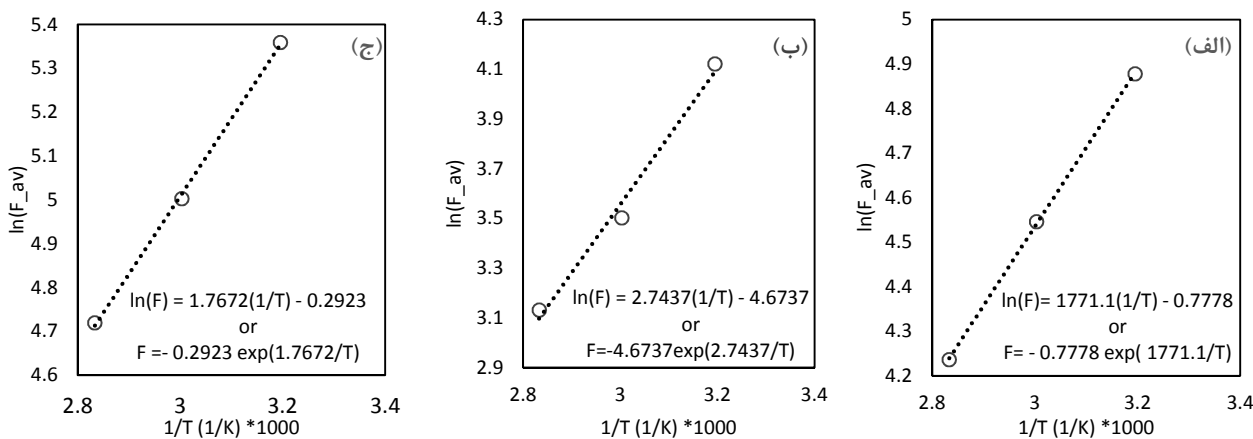
یکی از پارامترهای مهم و مؤثر بر رفتار رئولوژیکی پیشرانه‌های جامد پارامتر دما است. همان‌طور که در قسمت‌های قبل نیز گفته شد، در این پژوهش آزمایش‌ها در سه دمای ۴۰، ۶۰ و ۸۰°C انجام شدند. دمای ۸۰°C دمایی است که اکثر این فرمولاسیون‌ها در آن فرآیند شکل‌دهی از روش اکستروژن را تجربه می‌کنند و از این‌رو مطالعه رفتار رئولوژیکی آن‌ها در این دما بسیار حائز اهمیت است. در کارهایی که برای بررسی تغییرات رفتار با دما در گذشته نیز انجام پذیرفته است، سعی شده است دمای بالا نزدیک به دمای شکل‌دهی انتخاب شود [۲۱].



شکل ۴- بررسی اثر دما بر نتایج آزمایش جریان اسکوییز؛ (الف) CMDB1؛ (ب) CMDB2؛ (ج) CMDB3؛ (د) CMDB5.



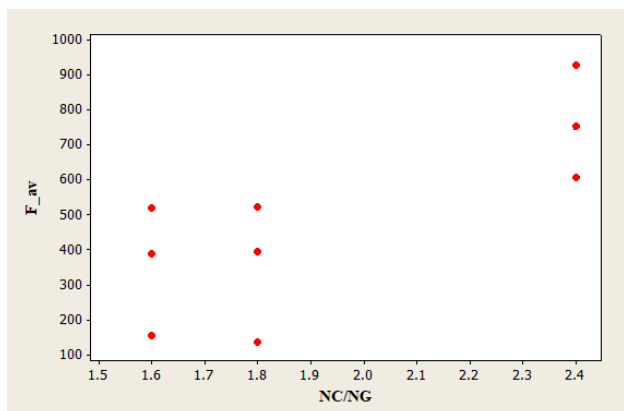
شکل ۵- نمودار نیروی متوسط بر حسب دما، برای سه نمونه (الف) CMDB4، (ب) CMDB6 و (ج) CMDB8.



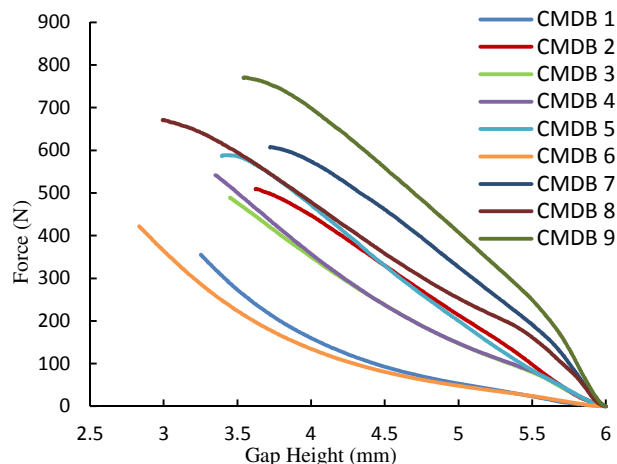
شکل ۶- رابطه نیرو با دما، به دست آمده از برازش خطی منحنی در مختصات لگاریتمی؛ (الف) CMDB4، (ب) CMDB6 و (ج) CMDB8.

نتایج عددی امکان مقایسه مستقیم نمونه‌های با ترکیب درصد‌های مختلف را فراهم می‌آورد که این امر در تصاویر (۹ تا ۱۱) قابل مشاهده است. از شکل (۸) نیز کاملاً مشهود است که سه نمونه آخر یعنی نمونه‌های ۷، ۸ و ۹ دارای بیشترین مساحت‌های زیر منحنی هستند. با دقت مجدد در جدول (۳) آشکار می‌شود که هر سه این نمونه‌ها مربوط به سطح بالای در نظر گرفته شده برای نسبت NC/NG (برابر با ۲/۴) است. به نوعی نسبت بالای مقدار نیتروسولولز به نیترو گلیسیرین منجر به تولید سخت‌ترین نمونه‌ها شده است. در این بین حتی نمونه ۸ نیز، با وجود آنکه پیشران‌های دوپایه محسوب می‌شود، به علت بالا بودن نسبت نیتروسولولز به نیترو گلیسیرین جزء سخت‌ترین نمونه‌ها قرار گرفته است. بررسی دقیق‌تر اثر نسبت NC/NG بر روی نیروی اسکویژ از طریق داده‌های گراف شکل (۹) امکان پذیر می‌شود. این تصویر نیز به صورت واضح‌تر افزایش نیروی نرمال وارد بر نمونه‌ها را برای حفظ سرعت صفحه متحرک، با افزایش نسبت NC/NG نمایش می‌دهد. برای متغیر نسبت NC/NG سه سطح ۱/۶، ۱/۸ و ۲/۴ در نظر گرفته شده است. با دقت بیشتر در گراف شکل (۹) چنین برمی‌آید که تفاوت چندانی بین دو نسبت ۱/۶ و ۱/۸ که به یکدیگر نزدیک هم هستند وجود ندارد، و در واقع نسبت ۲/۴ که اختلاف زیادی با دو سطح دیگر دارد، سبب این افزایش در نیروها شده است.

پارامتر دیگری که در طراحی آزمایش در نظر گرفته شده بود و از نمودارهای شکل‌های (۷ و ۸) اثر آن به راحتی قابل استنباط نیست، مقدار RDX در فرمولاسیون پیشران است. نتیجه کلی که از نمودار شکل (۷) قابل درک است و در شکل (۱۰) نیز به وضوح مشخص است، این است که افزودن RDX به پیشران دوپایه، که منجر به تولید پیشران دوپایه بهبود یافته می‌شود، سبب افزایش نیروی نرمال در آزمایش جریان اسکویژ می‌شود. اما اگر مقایسه بین دو مقدار غیر صفر نیترامین RDX یعنی ۱۳ و ۲۷ درصد مورد نظر باشد، از نادیده گرفتن داده‌های مربوط به نسبت NC/NG برابر ۲/۴ در شکل (۱۰)، به نظر می‌رسد که تفاوت چندانی بین رفتارهای این دو سطح وجود ندارد.

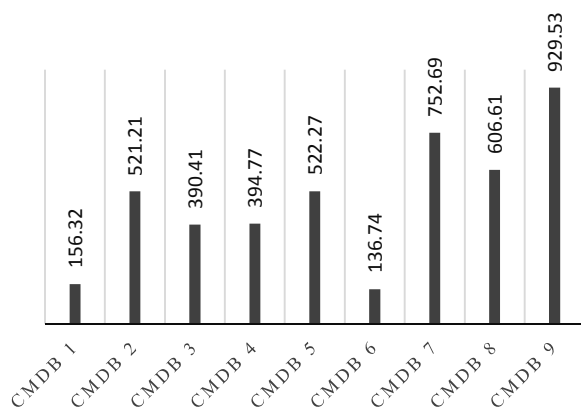


شکل ۹- نمودار اثر نسبت NC/NG بر روی نیروی متوسط جریان اسکویژ.



شکل ۷- منحنی‌های نیرو بر حسب ارتفاع نمونه، برای پیشران‌های CMDB 1 تا CMDB 9 در دمای ۸۰°C.

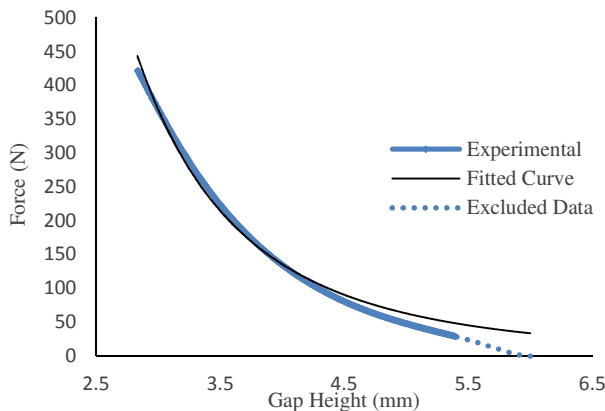
این نتایج عددی امکان مقایسه مستقیم نمونه‌های با ترکیب درصد‌های مختلف را فراهم می‌آورد؛ که این امر در شکل‌های (۹) تا (۱۱) قابل مشاهده است. از شکل (۸) نیز کاملاً مشهود است که سه نمونه آخر یعنی نمونه‌های ۷، ۸ و ۹ دارای بیشترین مساحت‌های زیر منحنی هستند. با دقت مجدد در جدول (۳) آشکار می‌شود که هر سه این نمونه‌ها مربوط به سطح بالای در نظر گرفته شده برای نسبت NC/NG (برابر با ۲/۴) است. به نوعی نسبت بالای مقدار نیتروسولولز به نیترو گلیسیرین منجر به تولید سخت‌ترین نمونه‌ها شده است. در این بین حتی نمونه ۸ نیز، با وجود آنکه پیشران‌های دوپایه محسوب می‌شود، به علت بالا بودن نسبت نیتروسولولز به نیترو گلیسیرین جزء سخت‌ترین نمونه‌ها قرار گرفته است.



شکل ۸- مساحت زیر نمودارهای نیرو-فاصله گپ مربوط به نمونه‌های سوخت ۱ تا ۹ در دمای ۸۰°C.

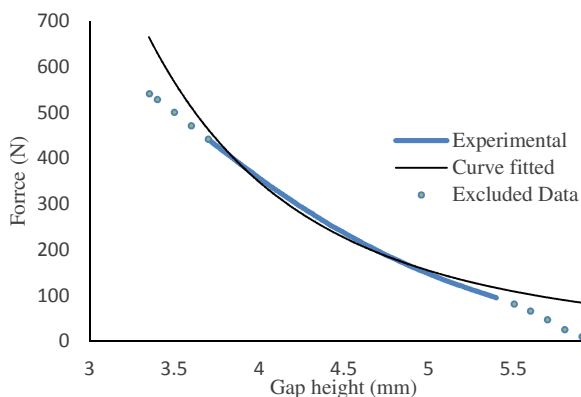
بررسی دقیق‌تر اثر نسبت NC/NG بر روی نیروی اسکویژ از طریق داده‌های گراف شکل (۹) امکان پذیر می‌شود. این تصویر نیز به صورت واضح‌تر افزایش نیروی نرمال وارد بر نمونه‌ها را برای حفظ سرعت این

همان گونه که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، مدل شروود قادر به پیش‌بینی پاسخ الاستیک اولیه ماده در آزمایش اسکوئیز نیست و به همین دلیل، داده‌های مربوط به این پدیده در برازش منحنی صورت گرفته در پژوهش حاضر کنار گذاشته شدند. این داده‌ها در نمودار شکل (۱۳) به صورت نقطه‌چین ترسیم شده‌اند.



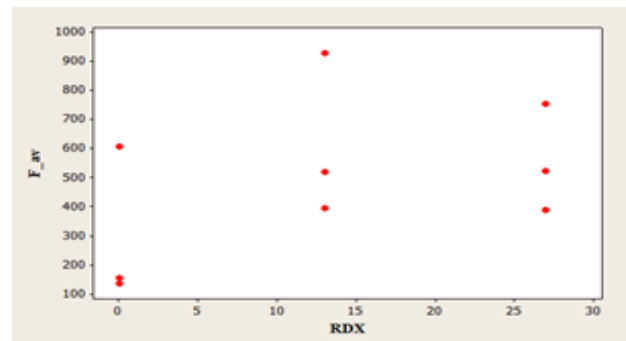
شکل ۱۳- برازش منحنی‌های حاصل از آزمایش اسکوئیز به کمک مدل شروود؛ پیش‌رانه CMDB6 (نمونه‌های پیش‌رانه دوپایه).

در مورد پیش‌رانه‌های دوپایه بهبودیافته همان‌طور که پیش‌تر هم گفته شد، افت نیرو بر اثر شکست نمونه‌ها به چشم می‌خورد که این افت‌ها نیز همانند پاسخ الاستیک اولیه توسط مدل‌های رایج قابل پیش‌بینی نیست. به همین دلیل این ناحیه نیز از میان داده‌های استفاده شده برای برازش منحنی کنار گذاشته شدند که به شکل ناحیه نقطه‌چین روی منحنی نیرو بر حسب ارتفاع (نمودار شکل ۱۴) مشخص شده‌اند.



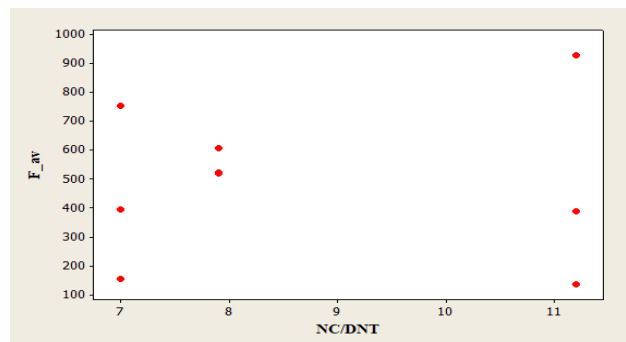
شکل ۱۴- برازش منحنی‌های حاصل از آزمایش اسکوئیز به کمک مدل شروود؛ پیش‌رانه CMDB4 (نمونه‌های پیش‌رانه دوپایه بهبود یافته).

برازش منحنی روی داده‌های آزمایش اسکوئیز منجر به یافتن پارامترهای رئولوژیکی سیالات هرشل بالکلی یعنی تنش تسلیم، ضریب مقاومت و اندیس پاورلا شد که این مقادیر برای همه نمونه‌ها به همراه دقت برازش در جدول (۴) آمده‌اند. مرتبه بزرگی تنش‌های تسلیم با نتایج مقاله منتشر شده کارتر و وارن [۲۴] مقایسه شد. کارتر و وارن در



شکل ۱۰- نمودار اثر درصد RDX بر روی نیروی متوسط جریان اسکوئیز.

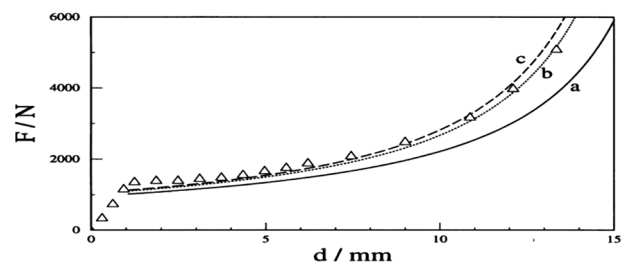
سه متغیر در نظر گرفته شده در تهیه سوخت‌های جامد، عبارت‌اند از: نسبت‌های NC/NG و NC/DNT و درصد RDX. در مورد نسبت NC/DNT به‌طور قطع با توجه به نمونه‌های تهیه شده در این تحقیق نمی‌توان سخن گفت؛ اما با توجه به گراف شکل (۱۱) می‌توان اثر این پلاستیسایزر را در خواص رئولوژیکی پیش‌رانه ناچیز استنباط نمود.



شکل ۱۱- نمودار اثر نسبت NC/DNT بر روی نیروی متوسط جریان اسکوئیز.

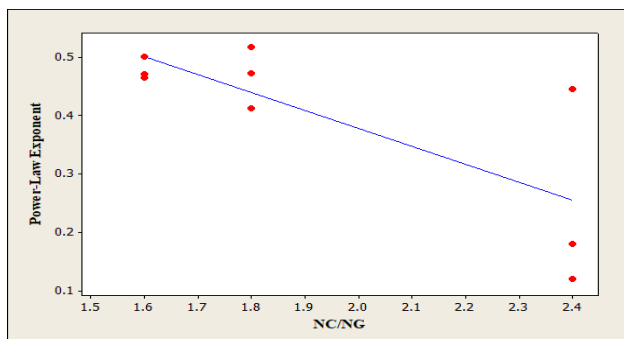
### ۳-۳- برازش منحنی و تعیین پارامترهای رئولوژیکی

روش حداقل مربعات یکی از رایج‌ترین روش‌ها در برازش منحنی است. به کمک نرم‌افزار متلب و استفاده از ابزار برازش منحنی، که از روش حداقل مربعات بهره می‌برد، برای گذراندن بهترین تابع از داده‌های تجربی به‌دست آمده از آزمایش‌ها استفاده شد. فرم تابع هدف برای برازش منحنی از معادله ارائه شده توسط شروود و دوربان [۱۵] که از جمله حل‌های تحلیلی پر کاربرد جریان اسکوئیز برای مدل هرشل-بالکلی محسوب می‌شود [۲۳]، انتخاب شد.

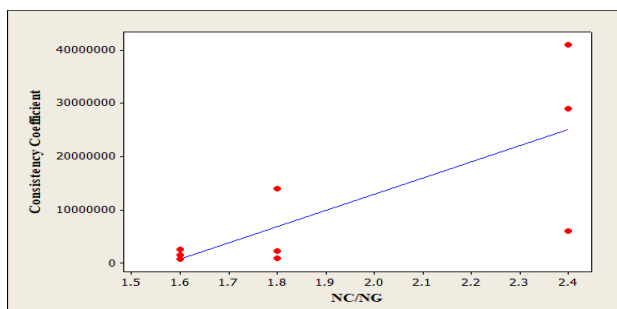


شکل ۱۲- کاربرد مدل تحلیلی شروود و دوربان در پیش‌بینی نتایج آزمایشگاهی آزمایش اسکوئیز؛ (a)  $m=0.1$ ؛ (b)  $m=0.25$ ؛ (c)  $m=0.3$  [۱۵].

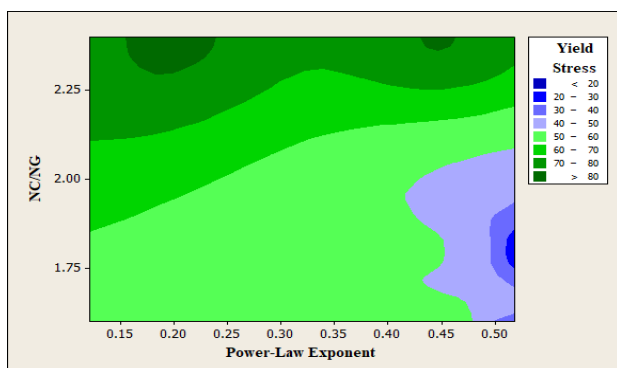




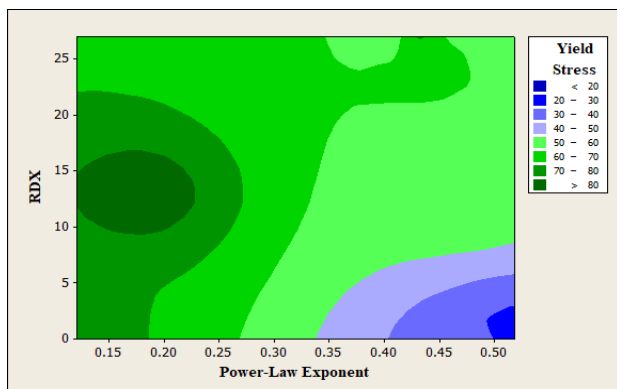
شکل ۱۶- تغییرات توان پاورلا بر حسب نسبت NC/NG در پیشران‌های دوپایه و دوپایه بهبود یافته.



شکل ۱۷- تغییرات ضریب گرانروی بر حسب نسبت NC/NG در پیشران‌های دوپایه و دوپایه بهبود یافته.



شکل ۱۸- کانتور تغییرات تنش تسلیم بر حسب تغییرات توان پاورلا و نسبت‌های مختلف از NC/NG در پیشران‌های دوپایه و دوپایه بهبود یافته.



شکل ۱۹- کانتور تغییرات تنش تسلیم بر حسب تغییرات توان پاورلا و نسبت‌های مختلف از RDX در پیشران‌های دوپایه و دوپایه بهبود یافته.

کار خود اثر مقدار نیتروگلیسرین و همچنین قدرت و مقدار حلال به‌کار رفته در تهیه پیشرانه دوپایه را در سه دمای ۲۰، ۳۵ و ۵۰°C بررسی نمودند. مشاهده شد که تنش تسلیم در پیشرانه دوپایه به‌دست آمده در این پژوهش، تقریباً در یک مرتبه بزرگی با نتایج کار کارتر و کارن است.

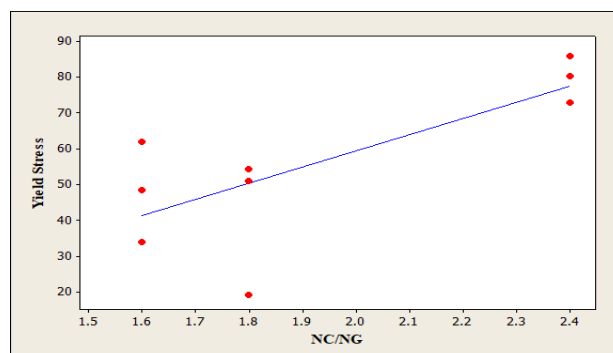
جدول ۴- پارامترهای مدل هرشل - بالکلی حاصل از برازش منحنی برای نمونه‌های 1 CMDB تا 9 CMDB.

Sample Code	Yield Stress (kPa)	Consistency Coefficient*	Power-law exponent	R-Square
CMDB 1	34.0	8.5E+05	0.502	0.9219
CMDB 2	62.1	1.6E+06	0.466	0.9531
CMDB 3	48.5	2.6E+06	0.471	0.9749
CMDB 4	51.0	1.4E+07	0.473	0.9772
CMDB 5	54.3	2.3E+06	0.413	0.9055
CMDB 6	19.2	9.7E+05	0.518	0.9732
CMDB 7	80.5	6.0E+06	0.446	0.9564
CMDB 8	73.1	4.1E+07	0.121	0.8376
CMDB 9	85.9	2.9E+07	0.180	0.8575

\* Dimension: Pa.s<sup>n</sup>

با توجه به اینکه فرمولاسیون نمونه‌های مورد آزمایش از طریق طراحی آزمایش تعیین شده‌اند، بنابراین در مرحله بررسی نیز شایسته است پارامترهای پاسخ از طریق نرم‌افزار طراحی آزمایش مورد تحلیل واقع شود؛ زیرا نمی‌توان با ثابت نگه داشتن یکی از پارامترها تأثیر دیگری را بر رفتار پیشرانه دوپایه و دوپایه بهبود یافته تحلیل کرد و بهتر است این تحلیل در قالب پاسخ طراحی آزمایش دیده شود. شکل (۱۵) همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش این نسبت، تنش تسلیم افزایش نشان داده است. این پدیده نشان می‌دهد NG بالاتر باعث می‌شود آمیزه پیشرانه دوپایه یا دوپایه بهبود یافته از تنش تسلیم کمتری برخوردار باشد.

شکل (۱۶) رفتار تغییرات توان پاورلا بر حسب نسبت NC/NG را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش این نسبت توان پاورلا کاهش می‌یابد. تغییرات در ضریب گرانروی نسبت به دو پارامتر قبلی با شیب ملایم‌تری اتفاق افتاده است (شکل ۱۷).



شکل ۱۵- تغییرات تنش تسلیم بر حسب نسبت NC/NG در پیشران‌های دوپایه و دوپایه بهبود یافته.

#### ۴- نتیجه گیری

در این کار پارامترهای رئولوژیکی نظیر تنش تسلیم، ضریب گرانشی و توان پاورلا برای دسته‌ای از فرمولاسیون‌های پیشرانه دوپایه و دوپایه بهبود یافته با استفاده از روش رئومتری جریان اسکوییز به دست آمد. هدف اصلی از انجام آزمایش‌های Squeeze حذف اثرات ناشی از لغزش در دیواره است که در اکثر روش‌های دیگر رئومتری قابل دستیابی نیست. نتایج نشان داد که در پیشرانه‌های دوپایه و دوپایه بهبود یافته رفتار الاستیک اولیه از نظر پدیده شناسی یکسان ولی از نقطه نظر مقدار متفاوت است، همچنین در منحنی جریان تقعر و شیب نمودارها حاکی از تفاوت ساختاری و رفتار متفاوت رئولوژیکی میان پیشرانه‌های دوپایه و دوپایه بهبود یافته است. با افزایش ترکیب درصد مواد پراثرژی نیترا مینی (RDX) در پیشرانه دوپایه بهبود یافته، نیروی متوسط جریان اسکوییز به سمت مقادیر بالاتر انتقال می‌یابد. با کاهش درصد نیترو گلیسرین نیز، رفتاری مشابه مشاهده می‌گردد. نتایج نشان داد مدل برازش منحنی شروود برای منحنی‌های جریان حاصل از پیشرانه‌های دوپایه بهتر از منحنی‌های جریان پیشرانه‌های دوپایه بهبود یافته عمل می‌کند که نشان دهنده انحراف رفتار رئولوژیکی پیشرانه‌های دوپایه بهبود یافته از سیالات هرشل - باکلی است. به دست آوردن ثوابت رئولوژیکی با این روش شرووی در ارتقای دانش بررسی رفتار جریان‌یابی این دسته از پیشرانه‌ها محسوب می‌شود. منحنی‌های دویعدی که به صورت کانتورهای تفکیک نواحی مختلف پاسخ‌ها هستند برای انتخاب فرمولاسیون‌های بهینه و حدس اولیه در مقادیر تنش تسلیم مناسب هستند.

#### مراجع

- [6] Ullah, I.; Waqas, M.; Hayat, T.; Alsaedi, A.; Khan, M. "Thermally Radiated Squeezed Flow of Magneto-Nanofluid Between Two Parallel Disks with Chemical Reaction"; *J. Therm. Anal. Calorim.* 2019, 135, 1021-1030.
- [7] Toutou, Z.; Roussel, N.; Lanos, C. "The Squeezing Test: a Tool to Identify Firm Cement-Based Material's Rheological Behaviour and Evaluate their Extrusion Ability"; *Cem. Concr. Res.* 2005, 35, 1891-1899.
- [8] Engmann, J.; Servais, C.; Burbidge, A. S. "Squeeze Flow Theory and Applications to Rheometry: A Review"; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 2005, 132, 1-27.
- [9] Scott, J. R. "Theory and Application of the Parallel-Plate Plastimeter. Part 2"; *Rubber Chem. Technol.* 1935, 8, 587-596.
- [10] Peek Jr, R. L. "Parallel Plate Plastometry"; *J. Rheol.* 1932, 3, 345-372.
- [11] Covey, G. H.; Stanmore, B. R. "Use of the Parallel-Plate Plastimeter for the Characterisation of Viscous Fluids with a Yield Stress"; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 1981, 8, 249-260.
- [12] Adams, M. J.; Edmondson, B.; Caughey, D. G.; Yahya, R. "An Experimental and Theoretical Study of the Squeeze-Film Deformation and Flow of Elastoplastic Fluids"; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 1994, 51, 61-78.
- [13] Yang, F. "Exact Solution for Compressive Flow of Viscoplastic Fluids under Perfect Slip Wall Boundary Conditions"; *Rheol. Acta* 1998, 37, 68-72.
- [14] Sherwood, J. D.; Durban, D. "Squeeze Flow of a Power-Law Viscoplastic Solid"; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 1996, 62, 35-54.
- [15] Sherwood, J. D.; Durban, D. "Squeeze-Flow of a Herschel-Bulkley Fluid"; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 1998, 77, 115-121.
- [16] Rabideau, B. D.; Lanos, C.; Coussot, P. "An Investigation of Squeeze Flow as a Viable Technique for Determining the Yield Stress"; *Rheol. Acta* 2009, 48, 517-526.
- [17] Muravleva, L. "Squeeze Flow of Bingham Plastic with Stick-Slip at the Wall"; *Phys. Fluids* 2018, 30, 030709.
- [18] Sherwood, J. D. "Model-Free Inversion of Squeeze-Flow Rheometer Data"; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 2005, 129, 61-65.
- [19] Covey, G. H.; Stanmore, B. R. "Rheological Behaviour of Victorian Brown Coal"; *Fuel* 1980, 59, 123-127.
- [20] Adams, M. J.; Aydin, I.; Briscoe, B. J.; Sinha, S. K. "A Finite Element Analysis of the Squeeze Flow of an Elasto-Viscoplastic Paste Material"; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 1997, 71, 41-57.
- [21] Eley, D. D.; Pepper, D. C. "The Visco-Elastic Behaviour of Cordite"; *Trans. Faraday Soc.* 1947, 43, 559-591.
- [22] Lewicki, P. P.; Spiess, W. E. "Rheological Properties of Raisins: Part I. Compression Test"; *J. Food Eng.* 1995, 24, 321-338.
- [23] Shaukat, A.; Sharma, A.; Joshi, Y. M. "Squeeze Flow Behavior of (Soft Glassy) Thixotropic Material"; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 2012, 167, 9-17.
- [24] Carter, R. E.; Warren, R. C. "Extrusion Stresses, Die Swell, and Viscous Heating Effects in Double-Base Propellants"; *J. Rheol.* 1987, 31, 151-173.
- [1] Martinez-Pastor, J.; Franco, P.; Franco-Menchon, J. A. "Optimization of Extrusion Process of Double-Base Propellants from Their Rheological Properties"; *Int. J. Mater. Form.* 2018, 1-14.
- [2] Chan, T. W.; Baird, D. G. "An Evaluation of a Squeeze Flow Rheometer for the Rheological Characterization of a Filled Polymer with a Yield Stress"; *Rheol. Acta.* 2002, 41, 245-256.
- [3] Hayat, T.; Khan, M.; Muhammad, T.; Alsaedi, A. "A Useful Model for Squeezing Flow of Nanofluid"; *J. Molecul. Liq.* 2017, 237, 447-454.
- [4] Kalyon, D. M.; Tang, H. S.; Karuv, B. "Squeeze Flow Rheometry for Rheological Characterization of Energetic Formulations"; *J. Energ. Mater.* 2006, 24, 195-212.
- [5] Grandes, F. A.; Sakano, V. K.; Rego, A. C.; Cardoso, F. A.; Pileggi, R. G. "Squeeze Flow Coupled with Dynamic Pressure Mapping for the Rheological Evaluation of Cement-Based Mortars"; *Cem. Concr. Compos.* 2018, 92, 18-35.